

Хлопков Елисей Алексеевич,
студент магистратуры,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург
e-mail: hlopkovelisey@mail.ru

Вьюненко Юрий Николаевич,
к. физ.-мат. н.,

ООО «Оптимикст ЛТД», г. Санкт-Петербург,

Волков Григорий Александрович,
к. физ.-мат. н.,

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

УДК 669: 539.3

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

ИЗ СПЛАВОВ TiNi50.6% И TiNi50.8%

DEFORMATION PROCESSES IN ELEMENTS FROM ALLOYS

TiNi50.6% AND TiNi50.8%

Аннотация. Технологическая эксплуатация силовых элементов из материалов с памятью формы ставит задачу о регулировании параметров формовосстановления. В работе показан анализ деформационно-силовых характеристик "металлических мышц", полученных путем выбора химического состава материала. Одинаковая нагрузка на кольцевые силовые пучковые элементы в зоне температуры гетерофазного состояния, препятствующая развитию эффекта памяти формы, приводит к значительным отличиям в их деформационных и силовых параметрах при малом изменении соотношения Ti и Ni. В работе исследованы образцы из проволоки диаметром 2мм из сплавов TiNi50.6ат.% и TiNi50.8ат.%.

Ключевые слова: кольцевые силовые пучковые элементы, эффект памяти формы, TiNi.

Abstract. Operation of power components from materials with shape memory poses the problem of control formulastyle. The paper shows the analysis of the deformation-force characteristics of the "metal muscle", obtained by selecting the chemical composition of the material. For the same load on the ring beam force elements in area temperature heterophase state, which prevents the development of shape memory effect leads to significant differences in their deformation and strength parameters with a small change in the ratio of Ti and Ni. The work examines the samples of wire with a diameter of 2mm alloy TiNi50.6at.% and TiNi50.8at.%.

Key words: ring power beam elements, the shape memory effect, TiNi.

В наши дни существует обширный класс металлов, обладающий термоупругими мартенситными переходами. К ним можно отнести сплавы на основе *Ti-Ni*, *Cu-Al-Ni*, *Cu-Sn*, *Mn-Cu*, *Fe-Mn* и другие. Эти материалы выделяют из ряда привычных конструкционных материалов уникальные

физико-механические свойства. Это такие функциональные явления, как эффект памяти формы (ЭПФ) – способность материала восстанавливать большие неупругие деформации (до 10-15%) при изменении температуры и псевдоупругость (ПУ) при изотермической нагрузке, эффект реверсивной памяти формы – знакопеременное изменение деформации при нагревании, обратимая память при термосменах, "дефект" модулей упругости, аномально высокое внутреннее трение в интервале температур фазового перехода, особенности температурной зависимости электросопротивления, дилатометрический эффект [1]. Необычные свойства данных сплавов нашли применение в космической промышленности (специальные устройства для монтажа на орбитальной космической станции "Мир" ферм "Софора" и "Рапана"), машиностроении (креофитные соединения), радиоэлектронике и электротехнике (соединения в оптической связи и электрической цепи), медицине (стенды, аппараты для лечения искривления позвоночника) [2].

Эффективность работы, совершаемой парой кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ) из никелида титана (1, рис.1) в технологических операциях получения слоистых структур средств защиты от вибрации, показала состоятельность данных конструкций. В результате наблюдения за технологической установкой был выявлен сложный процесс формоизменения силовых элементов при разных режимах нагрева [3]. В частности, влияние скорости нагрева на эволюцию формы силовых элементов, немонотонность деформационных процессов [4]. Была определена зависимость деформационно-силовых свойств "металлических мышц" от конструктивных параметров КСПЭ, наличия сил, препятствующих развитию ЭПФ, соотношения компонентов сплава [5].

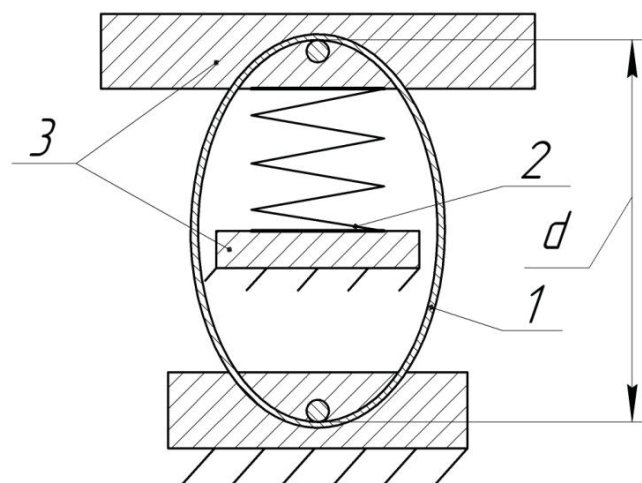


Рисунок 1 – Схема нагружения КСПЭ в динамометре ЛИНД: 1 – КСПЭ, 2 – контртело (спиральная пружина), 3 – подвижные пластины, d – характеристический размер

Результаты исследований [6], проведенные на образцах из сплавов $TiNi_{50.6\text{ат.}\%}$ и $TiNi_{50.8\text{ат.}\%}$, показали развитие процесса эффекта памяти формы при различных предварительных нагрузках в зоне температур гетерофазного состояния. В связи с этим представляет интерес анализ влияния степени деформации при минимальных температурах термоцикла.

Кольцевые силовые пучковые элементы изготовлены из проволоки диаметром 2 мм и являются бухтой, состоящей из пяти замкнутых круговых витков, имеющих внутренний диаметр $d=63$ мм (1, рис. 1).

Исследования проводились на специальном динамометре ЛИНД (рис. 1), созданном для изучения "металлических мышц" и имитирующим силовые связи в технологических операциях.

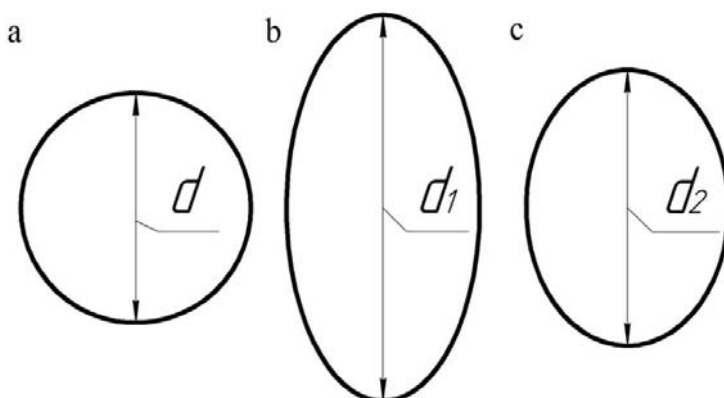


Рисунок 2 – Состояния КСПЭ:
а – исходное, б – КСПЭ после установки в ЛИНД перед нагревом,

с – КСПЭ после срабатывания ЭПФ во время нагрева

Нагружение КСПЭ (1, рис. 1) осуществляли при помощи контртела – стальной спиральной пружины (2, рис. 1). Величину начальной силы определяли расстоянием между двумя подвижными пластинами (3, рис. 1), нижняя пластина во время термоцикла была зафиксирована. На рис. 2 показаны состояния силовых элементов. В эксперименте определяли параметр $\Delta = d_1 - d_2$, который позволяет оценить развитие ЭПФ и силовые характеристики "металлических мышц". Нагрев динамометра до 130°C проходил в термостате. Охлаждение установки с испытуемой парой КСПЭ проводили в изотермических условиях в холодильной камере при $T=6^\circ\text{C}$. В процессе снижения температуры в зоне прямого мартенситного перехода материал "металлических мышц" находится в состоянии пластичности превращения, что дает контртелу не только восстановить значение d_1 , но и, как правило, увеличить этот параметр. Далее производилось деформирование образцов и осуществлялся следующий термоцикл.

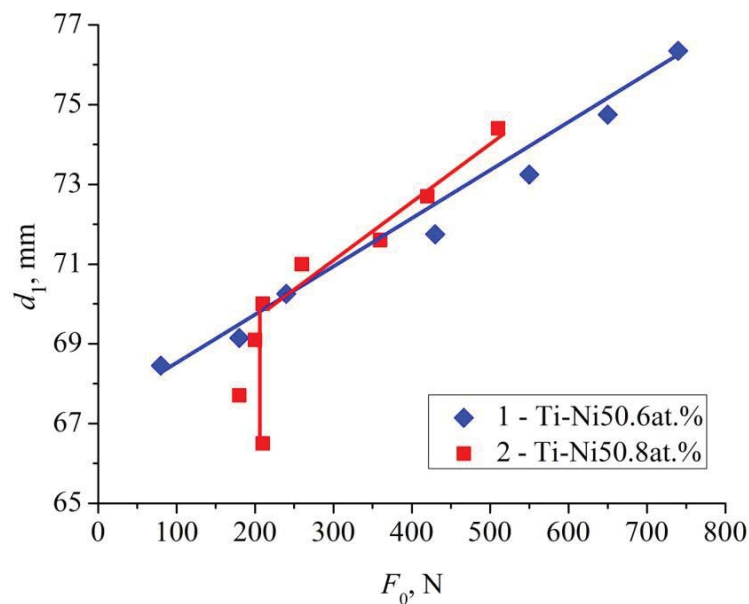


Рисунок 3 – Зависимость исходного размера d_1 от начального усилия F_0 при термоциклировании

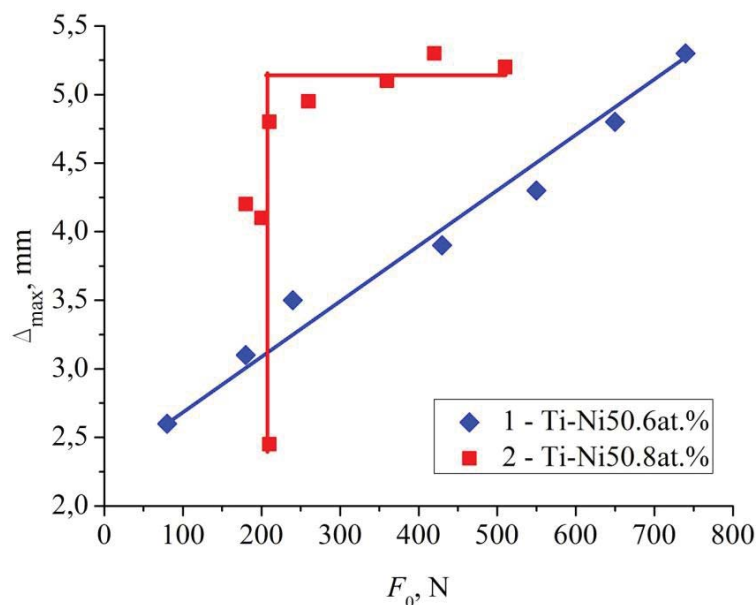


Рисунок 4 – Зависимость максимального значения параметра Δ_{\max} от начального усилия F_0 при термоциклировании

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики, иллюстрирующие исходный размер d_1 силовых элементов (рис. 3) и максимальное формовосстановление в результате эффекта памяти формы (рис.4) при различных условиях начального взаимодействия со стальной пружиной. Кривая 2 на рис. 3 демонстрирует рост значения d_1 при одинаковой нагрузке ~ 200 Н. При этом повышается и параметр формовосстановления Δ_{\max} (кривая 2, рис.4). С увеличением усилия F_0 на КСПЭ отмечается значительное возрастание d_1 (кривая 2, рис. 3), а в процессе восстановления формы "металлические мышцы" выходят на предельные генерации внутренних напряжений при значении $\Delta_{\max} \sim 5$ мм (кривая 2, рис. 4). Результаты исследования КСПЭ из сплава *TiNi*50,6ат.% показывают линейный рост обеих зависимостей (кривые 1, рис. 3 и рис. 4). Однако, для достижения максимального деформационного эффекта $\Delta_{\max}=5,3$ мм силовых элементов из *TiNi*50,8ат.% на этой паре требуются большие начальные силовые взаимодействия с контртелом при их деформировании в зоне температур гетерофазного состояния (рис. 4).

Отметим, что при $d_1=69$ мм и нагрузке $F_0 \sim 200$ Н "металлические мышцы" из сплава *TiNi*50,8ат.% показали существенно большую величину Δ (кривая 2,

рис. 5). Нагрев в термостате образца $TiNi_{50,6at.}\%$ проводился с 33 минуты термоцикла, до этого момента отогрев происходил при комнатной температуре (кривая 1, рис. 5).

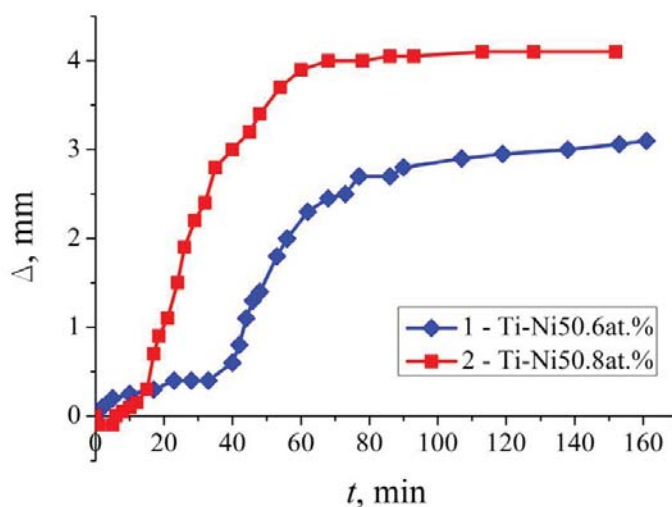


Рисунок 5 – Развитие ЭПФ в течение времени при $F_0 \sim 200N$ и $d_1=69mm$

Указанные особенности деформационно-силовых характеристик "металлических мышц" из сплавов с незначительным различием соотношения Ti и Ni могут оптимизировать работу технологических устройств, действующих на эффекте памяти формы: повышать и ограничивать силовые характеристики и параметры формовосстановления.

Список литературы

1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 218 с.
2. Беляев С.П., Волков А.Е., Ермолаев В.А. и др. Материалы с эффектом памяти формы / под ред. В.А. Лихачева. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1997–1998. – В 4-х т.
3. Тихомиров А.А., Артемьев И.В., Выюненок Ю.Н. Эффект памяти формы и деформационное поведение кольцевых силовых пучковых элементов // Сб. материалов XXI Петербургских чтений по проблемам прочности. – СПб.: Соло, 2014. – С. 248-250.
4. Выюненок Ю.Н. Деформационно-силовые характеристики кольцевых силовых пучковых элементов, работающих на эффекте памяти формы // Сб. материалов международного симпозиума "Перспективные материалы и технологии". – Витебск: Изд-во УО "ВГТУ", 2015. – С. 291-293.

5. Вьюненко Ю.Н. Исследование механических характеристик силовых элементов из материалов с ЭПФ // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – Т. 18, вып. 4. – Тамбов: Изд-во ТГУ, 2013. – С. 2023-2024.

6. Хлопков Е.А., Макарова Т.А., Волков Г.А., Вьюненко Ю.Н. Исследование влияния химического состава материала силовых элементов из никелида титана на их деформационно силовые свойства // Сб. материалов науч. конф. "Неделя науки СПбПУ", ИММиТ. Ч. 2. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 275-278.